

Capacidad floculante de coagulantes naturales en el tratamiento de agua

Capacity flocculant of natural coagulants in water treatment

MSc. David Choque-Quispe I davidchoqueq@hotmail.com; MSc. Yudith Choque-Quispe II ,
Mag. Aydeé M. Solano-Reynoso III , Ing. Betsy S. Ramos-Pacheco

I C.P. Ingeniería Agroindustrial, Universidad Nacional José María Arguedas, Andahuaylas, Apurímac, Perú; II Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, Cusco, Perú; III Universidad Tecnológica de los Andes, Andahuaylas, Apurímac, Perú

Resumen

La coagulación es el proceso más importante en el tratamiento del agua, que incluye la remoción de especies en suspensión, mediante la adición de coagulantes químicos, cuyo uso trae desventajas asociadas a altos costos de adquisición, producción de grandes volúmenes de lodo y el hecho de que afectan el pH del agua tratada. Es así que el objetivo fue evaluar la capacidad floculante de tres variedades de Cactáceas *Echinopsis pachanoi* , *Neoraimondia arequipensis* y *Opuntia ficus* en el tratamiento de agua residual artificial. Se aplicaron dosis del 1%, 2% y 3% de coagulante de las tres variedades de Cactáceas extraídas con los tres solventes al agua residual artificial, observándose un incremento significativo ($p\text{-value} < 0.05$) para la capacidad clarificante y el % de remoción, con el aumento de dosis de coagulante, presentando mejores resultados la variedad San Pedro. Los parámetros fisicoquímicos del agua tratada como el pH se incrementaron ligeramente de 6.61 del agua sin tratar a 7.58, mientras que la dureza y la alcalinidad no muestran diferencia significativa ($p\text{-value} > 0.05$), la DBO del agua con coagulante se incrementó con el porcentaje de aplicación.

Palabras clave: Coagulante natural, agua residual artificial, capacidad floculante.

Abstract

The coagulation is the most important process during the water treatment, which includes the removal of species in suspension by means of the addition of chemical coagulants, in which using brings disadvantages associated with high costs of acquisition, production of large volumes of mud and the fact that affect the pH of the treated water. Thus the objective was to evaluate the flocculant capacity of three varieties of Cacti *Echinopsis pachanoi*, *Neoraimondia arequipensis* y *Opuntia ficus* in the artificial wastewater treatment. Doses of 1%, 2%, and 3% coagulant of the three varieties of Cacti extracted with three solvents in the artificial wastewater were applied, observed a significant increase ($p\text{-value} < 0.05$) for

clarifying capacity and the removal %, with increasing doses of coagulant, the variety San Pedro showed better results. The physicochemical parameters of the treated water as the pH was slightly increasing from 6.61 to 7.58 untreated water, while hardness and alkalinity do not show a significant difference ($p\text{-value} > 0.05$), the DBO of water with coagulant increased with the percentage of application.

Keywords: natural coagulant, artificial wastewater, flocculant capacity.

INTRODUCCION

El agua potable debe presentar características de calidad como libre de turbidez, de color y de sabor perceptibles, así como otros parámetros regulados de acuerdo a las normativas de los países. Las aguas naturales raramente son de calidad satisfactoria para el consumo humano o el uso industrial y casi siempre deben ser tratadas [1].

La coagulación, se define como la adición de sustancias químicas y la provisión de mezcla, para que las partículas y algunos contaminantes disueltos se aglutinen en partículas más grandes que se puedan retirar mediante procesos de remoción de sólidos [2], el proceso fisicoquímico de coagulación logra desestabilizar partículas coloidales, precipitar y agrupar sólidos suspendidos, facilitando la extracción por medio de la formación de flocs [3], removiendo partículas coloidales y suspendidas del agua, reduciendo la turbidez, el color y en menor medida las bacterias [4].

Su aplicación incluye la adición de coagulantes químicos convencionales; sin embargo, existen desventajas asociadas al uso de estos coagulantes, como altos costos de adquisición, producción de grandes volúmenes de lodo y el hecho que afectan significativamente el pH del agua tratada [5,6].

El coagulante más usado es el sulfato de aluminio, el cual presenta muy buenos resultados en cuanto a la remoción de contaminantes, sin embargo, el impacto económico y medioambiental debido a su uso es muy alto. Además, su uso genera grandes cantidades de lodos de desecho, los cuales son difíciles de tratar [7], por otra parte los lodos remanentes generan tierras inertes no aptas para algún cultivo; los altos niveles de aluminio remanente en las aguas tratadas ponen en riesgo la salud pública debido que grandes cantidades pueden ser causantes del síndrome de Alzheimer [8], lo cual ha sido demostrado en investigaciones médicas realizadas en Inglaterra, donde se ha encontrado que el riesgo de contraer esta enfermedad es 1,5 veces mayor en aquellos sitios donde las concentraciones de aluminio en el agua exceden los 0,110 mg/L [9].

El uso de coagulantes naturales extraídos de plantas, para el tratamiento de aguas data de varios milenios [10] y, continuamente se hacen estudios que permiten identificar la potencialidad de distintas plantas para este propósito, y que permitan disminuir el uso de sustancias químicas sintéticas, así como la producción de lodos biodegradables.

Las cactáceas constituyen una de las familias botánicas más abundantes en el Perú, encontrándose en todos los pisos altitudinales, en una gran cantidad de variedades. Es así que desde tiempos remotos las cactáceas han sido importantes y han estado ligadas a una gran cantidad de culturas y pueblos latinoamericanos, en muchas partes del mundo se hace

uso de estas de muy distintas maneras y aplicaciones como la clarificación de aguas, como polímero natural.

Estos polímeros son complejos en su composición química, están constituidos principalmente por varios tipos de polisacáridos y proteínas. Algunos de ellos tienen propiedades coagulantes o floculantes y en muchos lugares son usados en forma empírica para aclarar el agua turbia con resultados satisfactorios.

Una de las cactáceas que más ampliamente se ha usado en la coagulación es el género *Opuntia* (familia de las Cactaceae), se caracteriza por la producción de un hidrocoloide, conocido como mucílago, que forma redes moleculares que retiene grandes cantidades de agua [11], es una sustancia polimérica compleja de naturaleza glucídica, con una estructura altamente ramificada [12], que contiene proporciones variables de L-arabinosa, D-galactosa, L-ramnosa y D-xilosa, así como ácido galacturónico en diferentes proporciones [13]. Otra cactácea que presenta propiedades coagulantes es el *Echinopsis pachanoi*, que tiene como nombre común "San Pedro" en algunas zonas del Perú, así como la *Neoraimondia arequipensis*, que recibe el nombre común de Ulluquite, no se sabe realmente si tiene o no relación con las conocidas Puyas de Raimondi, que crecen en diversas partes del Perú incluido el altiplano peruano-boliviano.

MATERIALES Y MÉTODOS

Preparación del agua artificial

Se preparó una solución madre disolviendo 25 g de caolín ($2\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) en 500 ml de agua destilada que se homogenizó por 30 minutos de forma manual, la disolución se dejó reposar por 24 horas, en seguida se tomaron 6 litros de agua potable y se adicionó 30 ml de disolución madre de caolín

Extracción de coagulante natural

Se adaptó y modificó el método propuesto por [14], se colectaron muestras de cada una de las cactáceas, a las cuales debieron eliminarse completamente sus espinos, posteriormente se cortaron en trozos pequeños y se licuaron a alta velocidad con agua destilada en una relación 1:1, luego de la molienda fina, se procedió a tamizarlo en una malla de 1000 micras, a fin de eliminar la fibra y obtener únicamente el mucilago (zumo filtrado). En seguida se realizó una extracción líquido - líquido del zumo filtrado, con un medio solvente en relación 1 de zumo: 2 de solvente de acuerdo a la tabla (01). Posteriormente se realizaron tantos cambios de solvente como sea necesario hasta la eliminación del color, en seguida el precipitado se secó a temperatura ambiente. Ya seca la muestra se molió finamente y en seguida se tamizó en una malla de 300 micras, obteniéndose un polvo fino y cristalizado de coagulante.

Actividad floculante - AF

Se adaptó la metodología utilizada por [15], se vertió 0.25 mL de solución de coagulante natural al 1%, 4.50 mL de suspensión de caolín y 0.25 mL de solución de hierro (III) al 1% en un tubo de ensayo y con ayuda de un Vortex se homogenizó por 15 segundos y se reposó por 5 min. Se retiró dos y medio mL del sobrenadante cuidadosamente de la parte superior del tubo de ensayo con una pipeta y se midió la absorbancia a 550 nm (A). y un control (B). La actividad floculante se calculó utilizando la ecuación (1). La prueba se repitió con coagulante natural al 2% y 3%.

$$AF = \frac{1}{A} + \frac{1}{B} \quad ec. (1)$$

En la tabla 1 se presenta la matriz de diseño experimental.

Tabla 1
Matriz de diseño experimental

Variedad	Variable de entrada		Variable de salida
	Tratamiento	Tipos de solvente	
<i>Echinopsis pachanoi</i> (San pedro)	T1	Etanol al 96%	R1
	T2	NaCl 0.25M	R2
	T3	Agua	R3
<i>Neoraimondia arequipensis</i> (Ulluquite)	T1	Etanol al 96%	R4
	T2	NaCl 0.25M	R5
	T3	Agua	R6
<i>Opuntia ficus</i> (Tuna)	T1	Etanol al 96%	R7
	T2	NaCl 0.25M	R8
	T3	Agua	R9

Ri, respuesta numérica de la variable de respuesta "i"

Evaluación del porcentaje de remoción

La eficiencia del proceso se determinó mediante el porcentaje de remoción (%R) de turbidez de acuerdo a la ecuación (2) [16].

$$\%R = \frac{Turbidez_{inic} - Turbidez_{fin}}{Turbidez_{inic}} * 100 \quad ec. (2)$$

Evaluación de las características fisicoquímicas

Se realizó la caracterización de los parámetros de calidad del agua tratada, tales como: pH, alcalinidad total, dureza total y DBO [17].

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El coagulante de la variedad *Echinopsis pachanoi* extraído con etanol muestra mayor actividad floculante (tabla 2), asimismo se parecía que la actividad floculante aumenta con el incremento de la concentración de coagulante en el agua residual artificial para todos los casos, [15] encontraron un valor de 36.54% para la actividad floculante de la pectina con concentración de 30 ppm (0.003%) en agua residual artificial formulada con caolín y hierro (III), y 10.53% en agua residual artificial formulada con caolín y cromo (III), aunque en ambos casos existe un descenso de la actividad floculante con el incremento de concentración de pectina.

Tabla 2**Actividad Floculante del coagulante de la variedad *Echinopsis pachanoi***

Solución coagulante (%)	Actividad floculante (%)								
	Etanol			NaCl			Agua		
	\bar{x}	\pm	s	\bar{x}	\pm	s	\bar{x}	\pm	s
1	47.394 ^a	\pm	0.460	44.878 ^c	\pm	0.722	44.277 ^e	\pm	0.302
2	48.399 ^b	\pm	0.188	46.584 ^d	\pm	0.480	45.237 ^f	\pm	0.307
3	48.580 ^b	\pm	0.063	46.756 ^d	\pm	0.399	45.266 ^f	\pm	0.271

Donde: \bar{x} es la media; s es la desviación estándar

*Las letras iguales significan que no hay diferencia significativa, evaluadas a través del test Tukey, con $\alpha = 5\%$

El coagulante de la variedad *Neoraimondia arequipensis* así como la variedad *Opuntia ficus* presentan mejores actividades floculantes cuando son extraídos con etanol (tablas 3 y 4),

Tabla 3**Actividad Floculante del coagulante *Neoraimondia arequipensis***

Solución coagulante (%)	Actividad floculante (%)								
	Etanol			NaCl			Agua		
	\bar{x}	\pm	S	\bar{x}	\pm	s	\bar{x}	\pm	s
1	28.407 ^a	\pm	0.944	27.624 ^c	\pm	1.121	27.093 ^d	\pm	0.460
2	30.355 ^b	\pm	0.114	27.666 ^c	\pm	0.251	27.620 ^d	\pm	0.245
3	30.382 ^b	\pm	0.114	27.733 ^c	\pm	0.070	27.640 ^d	\pm	0.107

Donde: \bar{x} es la media; s es la desviación estándar-

*Las letras iguales significan que no hay diferencia significativa, evaluadas a través del test Tukey, con $\alpha = 5\%$

Tabla 4**Actividad Floculante del coagulante *Opuntia ficus***

Solución coagulante (%)	Actividad floculante (%)								
	Etanol			NaCl			Agua		
	\bar{x}	\pm	s	\bar{x}	\pm	s	\bar{x}	\pm	s
1	46.128 ^a	\pm	0.390	44.279 ^b	\pm	0.544	42.653 ^d	\pm	0.337
2	46.408 ^a	\pm	0.114	45.066 ^{b,c}	\pm	0.156	43.694 ^e	\pm	0.245
3	46.475 ^a	\pm	0.219	45.197 ^c	\pm	0.213	44.051 ^e	\pm	0.265

Donde: \bar{x} es la media; s es la desviación estándar

*Las letras iguales significan que no hay diferencia significativa, evaluadas a través del test Tukey, con $\alpha = 5\%$

Por otra parte el coagulante de la variedad *Echinopsis pachanoi* extraída con el solvente etanol presenta mejor porcentaje de remoción (tabla 5), aunque en todos los casos es mayor al 99%, incrementándose con el porcentaje de aplicación de los coagulantes, similares resultados se reportaron para el coagulante extraído de la *Neoraimondia arequipensis* (tabla 6) y del coagulante extraído de la *Opuntia ficus* (tabla 7).

Tabla 5
Porcentaje de remoción del coagulante de la variedad *Echinopsis pachanoi*

Solución coagulante (%)	Porcentaje de remoción (%)								
	Etanol			NaCl			Agua		
	\bar{x}	\pm	s	\bar{x}	\pm	s	\bar{x}	\pm	s
1	99.213 ^a	\pm	0.059	99.099 ^c	\pm	0.100	98.938 ^d	\pm	0.055
2	99.305 ^{a,b}	\pm	0.060	99.215 ^c	\pm	0.057	99.157 ^e	\pm	0.061
3	99.443 ^b	\pm	0.060	99.247 ^c	\pm	0.061	99.224 ^e	\pm	0.059

Donde: \bar{x} es la media; s es la desviación estándar.

*Las letras iguales significan que no hay diferencia significativa, evaluadas a través del test Tukey, con $\alpha = 5\%$

Tabla 6
Porcentaje de remoción del coagulante de la variedad *Neoraimondia arequipensis*

Solución coagulante (%)	Porcentaje de remoción (%)								
	Etanol			NaCl			Agua		
	\bar{x}	\pm	s	\bar{x}	\pm	s	\bar{x}	\pm	s
1	92.636 ^a	\pm	0.326	92.098 ^b	\pm	0.222	91.435 ^c	\pm	0.182
2	92.785 ^a	\pm	0.180	92.230 ^b	\pm	0.106	92.012 ^d	\pm	0.124
3	92.777 ^a	\pm	0.091	92.301 ^b	\pm	0.087	92.143 ^d	\pm	0.143

Donde: \bar{x} es la media; s es la desviación estándar.

*Las letras iguales significan que no hay diferencia significativa, evaluadas a través del test Tukey, con $\alpha = 5\%$

Tabla 7
Porcentaje de remoción del coagulante de la variedad *Opuntia ficus*

Solución coagulante (%)	Porcentaje de remoción (%)								
	Etanol			NaCl			Agua		
	\bar{x}	\pm	s	\bar{x}	\pm	s	\bar{x}	\pm	s
1	99.020 ^a	\pm	0.152	98.573 ^b	\pm	0.062	98.695 ^c	\pm	0.202
2	99.114 ^a	\pm	0.180	98.661 ^b	\pm	0.054	98.872 ^c	\pm	0.124
3	99.147 ^a	\pm	0.058	98.685 ^b	\pm	0.200	98.934 ^c	\pm	0.056

Donde: \bar{x} es la media; s es la desviación estándar

*Las letras iguales significan que no hay diferencia significativa, evaluadas a través del test Tukey, con $\alpha = 5\%$

En general los coagulantes de las Cactáceas en estudio extraídos con etanol presentan mejor porcentaje de remoción de sólidos, y de estos la variedad *Echinopsis pachanoi* presenta resultados mayores al 99%, [16] encontraron porcentajes de remoción entre 95 % a 99.6 % para muestras de agua de río cuando utilizó coagulantes como Sulfato de Aluminio, Floculante Praestol 650 TR y Floculante Químico Artesanal, [18] encontraron una remoción de sólidos del 83% cuando utilizó Moringa como coagulante natural a 400 ppm, asimismo encontró un porcentaje de remoción que va de 20% a 100% cuando utilizó quitosano como coagulante, para la tuna *Cactus lefaria* el porcentaje de remoción estuvo entre 94% a 100% para dosis mínimas de 45 ppm y máximas de 180 ppm en todos los casos agregando CaO, mientras al agregar Sulfato de Aluminio a 12 ppm logró remociones de sólidos hasta del 92% cuando se aplicó 22.5 ppm de coagulante de tuna *Cactus lefaria* .

Se reportaron dosis óptimas de *Opuntia ficus* en el rango de 10 a 20 mg/l que remueven entre 80 a 90% de sólidos [19], mientras que [18] encontraron dosis de 45 mg/L, [20] encontraron porcentajes de remoción que van del 70% a 80% para coagulantes naturales procedentes de semillas de castaño y bellota de algunas variedades de *Fagaceae* como el roble común y castaña Europea, asimismo [21] encontraron porcentajes del 68% a 90% de remoción cuando aplico coagulante natural de mucilago de *Plantago psyllium* . [22] sintetizaron un copolímero coagulante de poliacrilamida combinado con almidón de *Metroxylum sagu* , un material extraído de una palma asiática, el estudio demostró una alta remoción de turbiedad del 97 % en soluciones estándar de caolinita.

[23] comprobó la efectividad de coagulación de un polímero natural extraído de las pencas de *Opuntia cochinellifera* (planta nativa de Centroamérica) en aguas superficiales, [24] propusieron la mezcla de un polímero natural basado en almidón extraído de la yuca (*Manihot esculenta* Crantz) con sulfato de aluminio comercial, comparando la eficiencia de remoción de partículas suspendidas con la eficiencia alcanzada con solamente sulfato de aluminio grado comercial, logrando rendimientos de remoción del 97.9 % a 98.7% para agua superficial de un río.

El pH inicial de 6.61 se incrementa en todas las aguas tratadas con los diferentes coagulantes naturales (tabla 8), [25] muestra una ligera disminución del pH de 7.46 del agua residual inicial a pH 7.43 del agua tratada con variedades de *Opuntia*, [16] muestra una disminución considerable del pH del agua del río de 6.7 hasta 5.2 al aplicar coagulante floculante químico artesanal, por otra parte [24] evidenciaron que el pH del agua tratada con mezclas de coagulantes de almidón de yuca y Sulfato de Aluminio no varió significativamente presentando tendencias menos ácidas hasta 6.7 desde un valor inicial del agua sin tratar de 6.9, [26] al tratar aguas residuales mineras con una mezcla de coagulantes cal - kollpa (alumbre del Altiplano) mostró un incremento del pH de 5.83 a 7.87.

Tabla 8
pH del agua tratada con los coagulantes naturales

Variedad	Solución coagulante (%)	pH						p-value*
		Etanol		NaCl		Agua		
		\bar{x}	$\pm s$	\bar{x}	$\pm s$	\bar{x}	$\pm s$	
Echinopsis pachanoi (San pedro)	1	6.98	± 0.04	7.34	± 0.03	7.33	± 0.02	0.000
	2	7.25	± 0.02	7.56	± 0.04	7.37	± 0.01	0.000
	3	7.28	± 0.01	7.58	± 0.02	7.37	± 0.01	0.000
	p-value*	0.0000		0.0002		0.0052		
Neoraimondia arequipensis (Ulluquite)	1	6.75	± 0.03	7.32	± 0.01	7.26	± 0.04	0.000
	2	6.93	± 0.04	7.48	± 0.02	7.32	± 0.01	0.000
	3	7.02	± 0.01	7.51	± 0.01	7.33	± 0.02	0.000
	p-value*	0.0001		0.0000		0.0206		
Opuntia ficus (Tuna)	1	6.68	± 0.03	7.21	± 0.02	7.19	± 0.03	0.000
	2	6.90	± 0.02	7.32	± 0.02	7.25	± 0.01	0.000
	3	6.96	± 0.02	7.33	± 0.01	7.26	± 0.01	0.000
	p-value*	0.0000		0.0001		0.0100		
pH inicial = 6.61 (agua artificial)								

Donde: \bar{x} es la media; s es la desviación estándar

*Evaluado a un nivel de significancia del 5%

En cuanto a la dureza del agua residual artificial al someterlas a los diferentes tratamientos de coagulación con los coagulantes naturales se aprecia un aumento no significativo ($p\text{-value} > 0.05$) con el incremento del porcentaje coagulante natural extraído (tabla 9), aunque para el caso del agua tratada con porcentajes del 1%, 2% y 3% de coagulante de *Echinopsis pachanoi* extraído con etanol se observa un ligero incremento, este no es significativo ($p\text{-value} = 0.0870$). [25] reporta que la dureza del agua artificial tratada con una mezcla de coagulantes de Sulfato de Aluminio y *Opuntia L.* disminuye ligeramente la dureza de 200 ppm de CaCO₃ a 196 ppm de CaCO₃, [26] mostraron un incremento de 692.0 a 942.0 ppm de CaCO₃ al tratar aguas residuales mineras con una mezcla de coagulantes de cal y kollpa (Alumbre del Altiplano), mientras que el mismo autor para el coagulante sulfato ferroso y cal disminuye la dureza de 1122.0 a 293.0 ppm de CaCO₃.

Tabla 9
Dureza del agua tratada con los coagulantes naturales

Variedad	Solución coagulante (%)	Dureza (ppm CaCO ₃)									p-value*
		Etanol			NaCl			Agua			
		\bar{x}	±	s	\bar{x}	±	s	\bar{x}	±	s	
<i>Echinopsis pachanoi</i> (San pedro)	1	266.3	±	1.5	268.3	±	0.6	269.0	±	1.0	0.0585
	2	268.0	±	1.0	269.0	±	1.0	269.0	±	1.0	
	3	269.0	±	1.0	269.0	±	1.7	269.3	±	0.6	
	p-value*	0.0870			0.7461			0.8697			
<i>Neoraimondia arequipensis</i> (Ullquite)	1	262.0	±	1.0	269.3	±	1.5	261.7	±	1.5	0.0008
	2	263.7	±	0.6	272.3	±	1.5	262.7	±	1.2	
	3	263.7	±	1.5	272.3	±	0.6	264.3	±	0.6	
	p-value*	0.2282			0.0456			0.0760			
<i>Opuntia ficus</i> (Tuna)	1	269.3	±	1.2	266.3	±	1.5	272.0	±	1.7	0.0102
	2	270.7	±	0.6	267.3	±	0.6	273.7	±	0.6	
	3	271.0	±	1.0	268.3	±	0.6	273.7	±	0.6	
	p-value*	0.1517			0.1250			0.1842			

Dureza inicial = 260 ppm

Donde: \bar{x} es la media; s es la desviación estándar

*Evaluado a un nivel de significancia del 5%

Tabla 10
DBO del agua tratada con los coagulantes naturales

Variedad	Solución coagulante (%)	DBO (mg/l)									p-value*
		Etanol			NaCl			Agua			
		\bar{x}	±	s	\bar{x}	±	s	\bar{x}	±	s	
<i>Echinopsis pachanoi</i> (San pedro)	1	2.41	±	0.10	1.24	±	0.11	2.26	±	0.02	0.0000
	2	2.65	±	0.04	1.58	±	0.06	2.46	±	0.05	
	3	2.72	±	0.04	1.70	±	0.04	2.49	±	0.07	
	p-value*	0.0028			0.0007			0.0033			
<i>Neoraimondia arequipensis</i> (Ullquite)	1	3.08	±	0.02	2.27	±	0.06	1.54	±	0.03	0.0000
	2	3.32	±	0.02	2.56	±	0.09	1.70	±	0.05	
	3	3.34	±	0.03	2.69	±	0.04	1.79	±	0.02	
	p-value*	0.0000			0.0007			0.0004			
<i>Opuntia ficus</i> (Tuna)	1	3.35	±	0.11	1.29	±	0.02	1.45	±	0.06	0.0000
	2	3.64	±	0.11	1.47	±	0.05	1.54	±	0.05	
	3	3.66	±	0.05	1.58	±	0.05	1.67	±	0.06	
	p-value*	0.0116			0.0006			0.0067			

DBO agua artificial= 0.57 mg/l

Donde: \bar{x} es la media; s es la desviación estándar

*Evaluado a un nivel de significancia del 5%

La DBO que origina los coagulantes naturales de las distintas variedades de Cactáceas extraídas con diferentes solventes y aplicados en diferentes porcentajes al agua artificial, en ella se aprecia que los coagulantes de las tres variedades extraídos con etanol proporcionan mayor DBO en el agua artificial (tabla 10), este hecho se debe a que estos coagulantes presentan mayor contenido de proteínas y sacarosa, este hecho es considerado por [27] indica que las proteínas contienen nitrógeno, de manera que también ejercen una demanda de oxígeno nitrogenada, y que toda la materia orgánica biodegradable contenida en una muestra de agua será oxidada a CO₂ y H₂O por microorganismos que usan el oxígeno molecular.

CONCLUSIONES

La capacidad clarificante de los tres coagulantes naturales muestran un incremento significativo ($p\text{-value} < 0.05$) con el aumento de la dosis de coagulante del 1% al 3%, así el coagulante procedente de la variedad *Echinopsis pachanoi* presenta mejores resultados para la Actividad Floculante y % de Remoción alcanzando valores de $48.580 \pm 0.063\%$ y $99.329 \pm 0.060\%$ respectivamente, cuando es extraído con el solvente etanol. Los parámetros fisicoquímicos del agua residual artificial tratada con los tres coagulante naturales extraídos con los diferentes solventes, como el pH muestran diferencia significativa, incrementándose ligeramente de 6.61 del agua sin tratar a 7.58, mientras que la dureza y la alcalinidad no muestran diferencia significativa ($p\text{-value} > 0.05$), por otra parte la DBO del agua residual artificial tratada muestra diferencia significativa ($p\text{-value} < 0.05$) incrementándose con el porcentaje de aplicación del coagulante de 0.57 mg O₂ /l inicial hasta valores de 3.66 ± 0.05 mg O₂ /L.

BIBLIOGRAFÍA

1. KIELY, G. Ingeniería ambiental. Fundamentos, entornos, tecnologías y sistemas de gestión. Vol. II. España. McGraw-Hill. 1331p, 1999.
2. DEMPSEY, B. Coagulant characteristics and reactions. En: Newcombe, G.; Dixon, D. (Eds.) Interface Science in Drinking Water Treatment: Theory and Applications. Arthur Hubbard (Series Editor), Interface Science and Technology, 2006, 10, 5-8.
3. INCHAUSTI, I.; SASIA, P.; KATIME, I. [en línea].Floculantes poliméricos no iónicos obtenidos en emulsión inversa: Síntesis y caracterización. [Junio 2014]. Disponible en internet: <http://www.ehu.es/reviberpol/pdf/publicados/inchausti.pdf> .
4. García, S. A. Estudio de la eficiencia de eliminación de radionúclidos naturales en procesos compatibles con el de potabilización de aguas, Tesis de grado, Universidad de Extremadura, España, 2005.
5. YIN, C.Y. Emerging usage of plant-based coagulants for water and wastewater treatment. Process Biochem, 2010, 45:1437-1444.
6. HAAROFF, J.; CLEASBY, J. Comparing aluminum and iron coagulants for in line filtration of cold waters. J. Am. Water Works Assoc, 1988, 80:168-175.
7. DONATO, N.; NAVARRO, R.; ÁVILA, M.; MENDIZÁBAL. Obtención de sulfato de quitosano y su aplicación en el proceso de coagulación-floculación de suspensiones coloidales aniónicas de caolinita. Revista Iberoamericana de Polímeros, 2006, 7.
8. FLATEN, T.P. (2001). Aluminium as a risk factor in Alzheimer's disease, with emphasis on drinking water. Brain Res. 2001, 55:187-196.

9. GONZÁLEZ, M.; HERNÁNDEZ, C.; KAEHLER, J. Determinación de aluminio en el agua potable de Valencia y localidades cercanas, Tesis de grado, Departamento de Química, Universidad de Carabobo, 1991.
10. SANGHI, R.; BHATTACHARYA, B.; SINGH, V. Cassia angustifolia seed gum as an effective natural coagulant for decolourisation of dye solutions. *Green Chem.*, 2002, 4:252-254.
11. SAAG, L.; SANDERSON, G.; MOYNA, P.; RAMOS, G. Cactasea mucilage composition. *J. Sci. Food Agr.*, 1975, 26:993-1000.
12. MATSUHIRO, B.; LILLO, L.; SÁENZ, C.; URZÚA, C.; ZÁRATE, O. Chemical characterization of the mucilage from fruits of *Opuntia ficus indica*. *Carbohydrate Polymer*, 2006, 63:263-267.
13. TRACHTENBERG, S.H.; MAYER, A. Calcium oxalate crystals in *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.: development and relation to mucilage cells— A Stereological analysis. *Protoplasma*. 1981, 109:271-283.
14. DUJARDIN, E.; LASZIO, P.; SACKS, D. (1985). The chlorophylls. An experiment in bio-inorganic chemistry *Journal of chemical education*. 1975, 52, 742-748.
15. SÁNCHEZ, S.; UNTIVEROS, G. Determinación de la actividad floculante de la pectina en soluciones de hierro (III) y cromo (III). *Rev. Soc. Quím. Perú*. 2004, 70, 4, 201-208.
16. YAGUAL, M.G.; TORRES, F. Análisis comparativo del proceso de floculación-coagulación en la potabilización de agua de río, usando como fuente de captación el Río Daule y el Río Babahoyo en la Provincia del Guayas. Tesis de grado Instituto de Ciencias Químicas y Ambientales, ESPOL. Guayaquil, Ecuador. 2012.
17. APHA. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater . 20. ed. Washington: APHA, 1998.
18. QUIRÓS, N.; VARGAS, M.; JIMÉNEZ, J. Desarrollo de coagulantes y floculantes para la remoción del color en aguas de consumo humano; el rio Humo, reserva forestal rio Macho. Centro de Investigación en protección ambiental. Instituto tecnológico de Costa Rica. 2010.
19. MARTÍNEZ, D.; CHÁVEZ, M.; DÍAZ, A.; CHACÍN, E.; FERNÁNDEZ, N. Eficiencia del cactus lefaria para su uso como coagulante en la clarificación de aguas, *Rev. Téc. Ing. Univ. Zulia*. 2003, 26, 1.
20. SCIBAN, M.; KLASNJA, M.; ANTOV, M.; SKRBIC, B. Removal of water turbidity by natural coagulants obtained from chestnut and acorn, *Bioresource Technology*. 2009, 100, 6639 – 6643.
21. BRATSKAYA, S.; SCHWARZ, S.; CHERVONETSKY, D. Comparative study of humic acids flocculation with chitosan hydrochloride and chitosan glutamate. *Water Research*. 2004, 38, 2955-2961.
22. QUDSIEH, I.Y.; FAKHRU, L.; RAZI, A.; KABBASHI, N.A.; MIRGHANI, M.E.S.; FANDI, K.G.; ALAM, M.Z.; MUYIBI, S.A.; NASEF, M.M. Preparation and characterization of a new coagulant based on the sago starch biopolymer and its application in water turbidity removal. *J. Appl. Polymer Sci*. 2008, 109, 3140-3147.

23. ALMENDÁREZ, N. Comprobación de la efectividad del coagulante (cochifloc) en aguas del lago de Managua "Piedras Azules". Revista Iberoamericana de Polímeros. 2004, 5, 1, 46-54.
24. SOLÍS, R; LAINES, J; HERNÁNDEZ J. Mezclas con potencial coagulante para clarificar aguas superficiales, Tesis de grado, División Académica de Ciencias Biológicas, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco México. 2012.
25. VAZQUEZ, O. Extracción de coagulantes naturales del nopal y aplicación en la clarificación de aguas superficiales. Tesis de posgrado. Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Autónoma de Nuevo León, Monterrey, México. 1994.
26. MIRANDA, R.; TTITO, S.; PALACIOS, R.; ALVAREZ, A. Tratamiento de aguas residuales minero metalúrgico por floculación y sedimentación con uso de floculantes naturales mejorados, Tesis de grado, Facultad de Ingeniería Química Universidad Nacional del Altiplano-Puno, Perú. 2012.
27. RAMOS, F.J. Análisis de la calidad del agua para consumo humano en el área urbana del puerto de San José, Tesis de posgrado, Departamento de Escuintla. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, Escuela de Química. 2006.

Recibido: Noviembre 2017
Aprobado: Marzo 2018

David Choque Q. davidchoqueq@gmail.com. I C.P. Ingeniería Agroindustrial, Universidad Nacional José María Arguedas, Andahuaylas, Apurímac, Perú.